



Anpassning av solelanläggningar till nordiska förhållanden



Anpassning av solelanläggningar till nordiska förhållanden

Josefin Sundström, RISE

Anna Malou Petersson, RISE

Pirjo Estola, Luleå Energi

Robin Andersson, Luleå tekniska universitet

Maria Svedjeholm, RISE

Ehsan Fooladgar, RISE





Förord

E2B2s vision är en resurs- och energieffektiv byggd miljö.

Bebyggelsesektorn svarar för cirka en tredjedel av Sveriges totala energianvändning och en effektivare energianvändning är en viktig del av utvecklingen av energisystemet. Hållbarhet, effektivitet och robusthet i bebyggelsen behöver stärkas och utvecklas. Lösningarna behöver samspela för att fungera och utnyttjas. Forskning, utveckling, innovation och kommersialisering spelar en avgörande roll.

I E2B2 arbetar forskare och andra aktörer tillsammans för att utveckla samhällets byggande och boende och effektivisera energianvändningen. Syftet med E2B2 är att ta fram ny kunskap, teknik, tjänster och metoder som bidrar till en hållbar energi- och resursanvändning i bebyggelsen.

E2B2 är ett forsknings- och innovationsprogram från Energimyndigheten där IQ Samhällsbyggnad är koordinator. Programmet startade 2013 och en andra programperiod pågår mellan 2018 och 2024. Projektet som beskrivs i den här rapporten har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten.

Stockholm, 21 december 2022

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Energimyndigheten tar ställning till framförda slutsatser, resultat eller eventuella åsikter.



Sammanfattning

Projektet *Anpassning av soleanläggningar till nordiska förhållanden* har behandlat soleanläggningar på stora låglutande tak i norr, som har särskilda utmaningar när det kommer till snöansamlingar. Vanligtvis monteras solcellsmoduler på sådana tak dikt an mot taket och vinklas upp endast ca 10°, vilket i nordliga förhållanden leder till snöackumulering på soleanläggningar i och med att snön inte kan glida av modulerna utan måste smälta bort. Snöskuggningen ger ett stort produktionsbortfall under vårvintern som i värsta fall kan utgöra upp mot 30% av årsproduktionen. Alternativa sätt att installera moduler på stora låglutande tak i norr har därför studerats med syfte att minska anläggningarnas produktionsförluster orsakade av snöskuggning. De alternativa utformningarna baserades på förslag från en workshop med olika aktörer med blandad erfarenhet där resultatet bland annat blev att höja upp och/eller vinkla modulerna.

En modell av de alternativa utformningarna och en konventionellt låglutande (10°) har byggts upp i ett CFD-program (Computational Fluid Dynamics) för att göra vindlastberäkningar. Modellen har verifierats genom tester i vindtunnel. Produktionen har simulerats i två olika simuleringsprogram, PVsyst och PV*SOL, där hänsyn tagits till både snö- och radskuggning. De olika utformningarna har sedan utvärderats utifrån vindlast och produktion med hänsyn till förluster och jämförts mot en konventionell låglutande anläggning för att utvärdera vilken utformning som är mest lämplig för stora låglutande tak i norr. En analys av framtida klimatförändringars påverkan på de olika utformningarna har även gjorts.

CFD-simuleringarna av koncepten visar att ju mer modulerna vinklas upp, desto större dragkraft får de av vinden, vilket innebär att dessa måste förankras bättre. En horisontell och en upphöjd låglutande anläggning får låga vindlaster likt den konventionella. Framtida arbete omfattar att testa de mest lovande utformningarna i fält efter att passande montage tagits fram som klarar de förväntade vindlasterna.

Simuleringarna av produktionen visar att alla koncept ger en lika stor eller högre produktion än en konventionell anläggning, men att vissa utformningar fortfarande har stora förluster på grund av snöskuggning. Snöskuggningen är baserad på antaganden så ett nästa steg skulle vara att undersöka snöansamling kring anläggningarna närmare. Det förväntade framtida klimatet med mindre snö och varmare temperaturer skulle kunna medföra att snöproblematiken minskar, dock inte i närtid, särskilt inte i de nordligaste delarna av Sverige.

Projektet förväntas leda till ökad installation av soleanläggningar i snörika regioner och i synnerhet på stora låglutande tak. Störst nytta av resultatet har de beställare, projektörer och installatörer som är osäkra på snöansamlingar kring låglutande konventionella anläggningar och vill utforska om det finns bättre sätt att utforma soleanläggningar på låglutande tak i norr.

Nyckelord: Soleanläggningar, nordiskt klimat, stora låglutande tak, CFD, snöskuggning, vindlaster, snölaster



Summary

The project *Adaption of solar PV installations to Nordic conditions* has dealt with solar installations on large flat roofs in the north which have challenges when it comes to snow accumulation. Usually, the solar cell modules are angled up by only about 10° , which in northern conditions leads to snow loaded and snow shadowed solar plants, as the snow has nowhere to. This results in production losses during the early spring which, in worst case, could be up to 30% of the yearly production. Alternative ways of installing modules on large flat roofs in the north have therefore been investigated to reduce the production losses caused by snow shadowing. The installation setup was discussed in a workshop consisting of experts with varying technical backgrounds and experiences, which resulted in designs where the modules were raised from the roof and/or tilted.

A model of the designs and the conventional low-tilted (10°) installation has been built in a CFD (Computational Fluid Dynamics) software to make wind load calculations. The model has been verified through tests in a wind tunnel. The production has been simulated in two different simulation programs, PVsyst and PV*SOL, where shading due to both snow and rows was considered. The various designs have then been evaluated based on wind load and production with consideration for losses and compared against a conventional low-tilted installation to evaluate which design is most suitable for large flat roofs in the north. An analysis of the impact of future climate change on the various designs has also been made.

The CFD simulations of the designs show that the more the modules are tilted, the higher the wind load which means that these must be anchored better. A horizontal and an elevated low-tilted module receive low wind loads like the conventional one. Future work includes testing the most promising designs in the field after appropriate mounting systems are developed that can handle the expected wind loads.

The simulations of the production show that all concepts provide an equal or higher production than a conventional. However, some designs still have large losses due to snow shading. The snow shading is based on assumptions so a next step would be to investigate snow accumulation around the installations more closely. The expected future climate with less snow and warmer temperatures could reduce the problems but not in the near term, especially not in the northernmost parts of Sweden.

The project is expected to lead to an increase in solar installations in snowy regions and especially on large flat roofs. Customers, designers, and installers who are unsure about snow accumulation around low-tilted conventional installations and want to explore whether there are better ways to design solar installations on flat roofs in the north benefit the most from the results.

Key words: Solar installations, Nordic climate, Large flat roofs, CFD, snow losses, wind load, snow load



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
1.1	BAKGRUND	7
1.2	SYFTE OCH MÅL	8
1.3	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR	8
2	GENOMFÖRANDE	9
2.1	KONCEPT	9
2.2	UTVECKLING OCH VERIFIERING AV CFD-MODELL	9
2.3	VINDLASTER	9
2.4	ELPRODUKTION	10
2.5	PÅVERKAN FRAMTIDA KLIMATFÖRÄNDRINGAR	10
3	RESULTAT	11
3.1	KONCEPT	11
3.2	UTVECKLING OCH VERIFIERING AV CFD-MODELL	12
3.3	VINDLASTER	12
3.4	ELPRODUKTION	12
3.5	PÅVERKAN FRAMTIDA KLIMATFÖRÄNDRINGAR	13
4	DISKUSSION	14
5	SLUTSATSER	16
6	PUBLIKATIONSLISTA	17
7	REFERENSER	18



1 Inledning och bakgrund

Denna rapport är en sammanfattning av projektets viktigaste resultat. För en komplett redovisning av projektet med fullständigt genomförande, resultat och vidare diskussion se referens i avsnitt 6. Publikationslista.

1.1 Bakgrund

Norra Sverige är attraktivt för etablering av såväl datahallar som produktionsanläggningar. Det finns idag begränsningar för vissa etableringar på grund av den elförbrukning dessa kräver. I tillägg har etablerad industri påbörjat en omfattande omställning mot en koldioxidfri produktion. En kartläggning genomförd av Energikontor Norr (Energikontor Norr, 2022) visar att elbehovet i bara Norrbotten kan ha ökat till 107 TWh år 2050, jämfört med 8 TWh år 2019. Det är högst angeläget att förbereda för en ökad produktion av förnybar el, där sol, vid sidan av vindkraft, har potential att bidra. Idag är endast en bråkdel av Sveriges installerade effekt av solceller belägen i de norra delarna av Sverige (Energimyndigheten, 2022). Att industriaktörer själva producerar en del av sin elkonsument, genom att installera solelanläggningar på sina tak, kan vara en del av lösningen.

Dessa, ofta låglutade tak, utgör en attraktiv yta för att installera relativt stora anläggningar. Det finns idag ett stort intresse för att installera solelanläggningar på låglutade tak i norra Sverige, men flera aktörer är tveksamma på grund av snöproblematiken. De montagelösningar som finns på marknaden innebär låglutade moduler med en lutning på ca 10° monterade dikt an mot taket (hädanefter kallad "konventionell utformning/anläggning"). I snörika regioner medför detta att snö ansamlas på anläggningarna vilket bidrar till både snöskuggning och snölast.

Tidigare studier avseende snöskuggning i Norge respektive Sverige (Øgaard, Riise & Selj, 2021; van Noord, Landelius & Andersson, 2021) omfattande totalt 270 solelanläggningar visade på snörelaterade produktionsförluster om 0–20%. Variationen berodde på om anläggningen är belägen nära kusten eller i inlandet, latitud, lutning på modulerna och anläggningens utformning. De låglutade anläggningar som studerats i projektet *SunCold* (Tillväxtverket, Ärende-ID 20201303) har blivit snöfria först långt in i april och i vissa fall maj, och kan i ett värsta scenario leda till en snöskuggningsrelaterad förlust på 30% av årsproduktionen (Lindh et al, 2020). Vidare kan snötyngden på modulerna ge upphov till skador, på såväl modul som montageanordning, och i värsta fall skulle taket kunna ta skada.

Genom att förhindra ackumulerad snö på solelanläggningar under de månader då solinstrålningen är väsentlig, så kan dess fulla produktionspotential realiseras. Detta bidrar dels till en samhällsnytta genom ett tillskott av förnybar el, dels potentiellt en nytta för anläggningsägaren som får en kortare återbetalningstid. Det senare är dock förknippat med den eventuellt ökade kostnaden för att hålla modulerna snöfria. Solelanläggningar kan hållas snöfria antingen genom att med en passiv eller aktiv metod ta bort snö, eller genom att utforma anläggningen på ett visst sätt för att undvika snö ansamlas på den. En alternativ utformning ger förändrade förutsättningar gällande tex vindlast och produktion.



1.2 Syfte och mål

Projektet syftar till att skapa ny kunskap för hur stora låglutade tak på nordliga breddgrader kan utnyttjas effektivt för solelproduktion genom att fokusera på hur solelanläggningar på sådana tak ska utformas för att undvika snöskuggning, öka anläggningens produktion av solex och klara förväntade vindlaster. Hänsyn har även tagits till framtida klimatförändringar. Projektet har följande specifika mål, som också översiktligt beskriver dess genomförande:

1. Utifrån existerande kunskapsläge ta fram ett antal relevanta teoretiska utformningar av solelanläggningar anpassade för stora låglutade tak i snörika regioner.
2. Bygga upp och verifiera en Computational Fluid Dynamics (CFD)-modell för solelanläggningar på stora låglutade tak i nordliga förhållanden.
3. Beräkna vindlaster med CFD-modellen för de teoretiska utformningarna i punkt 1, med nuvarande låglutade, konventionella, utformning som referens.
4. Beräkna producerad solex, med och utan förväntad förlust på grund av snö- och radskuggning, för de teoretiska utformningarna i punkt 1, med nuvarande konventionella utformning som referens.
5. Bedöma hur framtida klimatförändringar kan påverka resultatet i punkt 3 och 4.

Projektet är del i att avancera anpassningen av solelanläggningar till nordiska förhållanden och det klimat som råder i Sverige. Den största förväntade nyttan med projektet är att kunna tillvarata de stora och outnyttjade låglutade taktyper som finns på industrifastigheter, men även andra typer av fastigheter, för effektiv produktion av förnyelsebar energi.

1.3 Omfattning och avgränsningar

Projektet är avgränsat till att kvantitativt studera vindlaster som verkar på modulerna samt dess elproduktion med och utan snö- och radskuggning för ett begränsat antal utformningar av solelanläggningar. Projektet har inte kvantitativt utvärderat andra relevanta faktorer så som snölast och nödvändigt montagesystem, som i förlängningen behövs för att kunna avgöra vilken utförande som är mest lämpligt och hur kostnadsbilden kommer se ut. Utformningarna har utvärderats utifrån två orter i Sverige, Luleå i norr och Norrköping i söder, och har pågått från 1 juli 2020 till 31 december 2022.



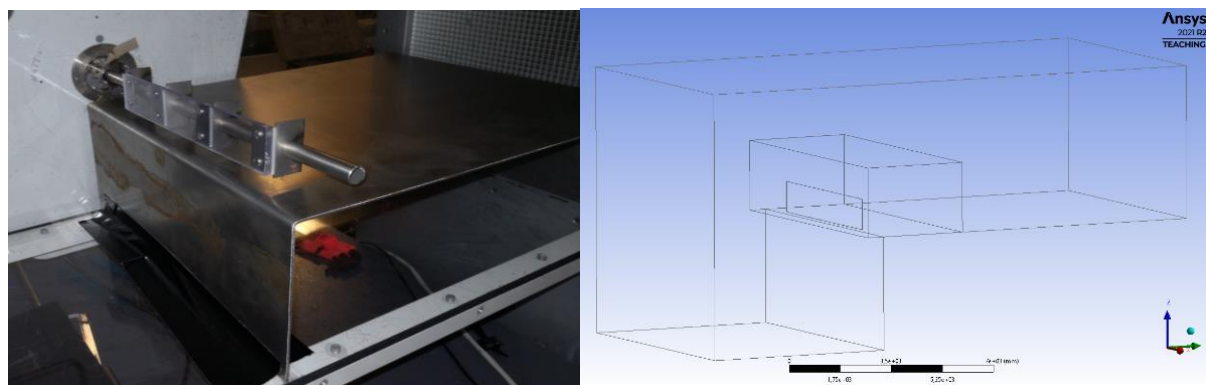
2 Genomförande

2.1 Koncept

För att ta fram idéer på alternativa utformningar genomfördes en workshop med projektgruppen och externa deltagare med blandade erfarenheter inom till exempel montage, arkitektur och energi med representation från såväl forskningsinstitutioner som näringsliv. Workshopen hade totalt 18 deltagare och utfördes digitalt på grund av den då pågående pandemin. Deltagarna arbetade med den övergripande frågeställningen "Hur kan man bäst utforma solelanläggningar på platta och låglutade tak utifrån snö, vind och solinstrålning?". De resulterande koncepten utvärderades kvalitativt med avseende på förväntad snöackumulering, elproduktion och vindlast och fem koncept valdes för vidare utvärdering.

2.2 Utveckling och verifiering av CFD-modell

En numerisk beräkningsmetod (Computational Fluid Dynamics, CFD) har använts för att simulera luftflödet över en modell av en rad solcellsmoduler med syfte att beräkna vilka vindlaster modulerna utsätts för, se till höger i Figur 1. För att validera CFD-modellen utfördes ett antal experiment i en vindtunnel. En skalad modell (1:30) av en rad med tre vertikala moduler användes, till vänster i Figur 1, där drag- och lyftkraft på modulraden uppmättes vid olika inloppshastigheter från 5 m/s upp till 18 m/s (vilket var den maximala hastigheten för fläkten i vindtunneln). Simuleringarna utfördes i Ansys Fluent och är gjorda med den numeriska metoden RANS och turbulensmetoden k-omega SST. Modulraden ställdes i olika vinklar för en bredare verifiering av CFD-modellen. De med CFD beräknade vindlasterna kunde sedan jämföras mot de som uppmätts i vindtunneln. På grund av begränsningar i vindtunneln och att tidigare studier (Jubayer & Hangan, 2016; Warsido m.fl., 2014) visat att första raden utsätts för de största krafterna så undersöktes en modulrad.



Figur 1: Till vänster den skalade modellen i vindtunneln och till höger visas vindtunneln uppbyggd i programmet Ansys där CFD-simuleringarna utfördes.

2.3 Vindlaster

Efter att CFD-modellen verifierats mot tester i vindtunneln byggdes modeller av de fem koncepten och den konventionella anläggningen upp i Ansys i skala 1:30. Vid behov anpassades modellerna för



utvärdering i Luleå respektive Norrköping. Vindriktningen applicerades rakt horisontellt eftersom tidigare studier (Irtaza & Agarwal, 2018; Jubayer & Hangan, 2016) visat att det är då den största kraften på modulerna fås. Simuleringarna gjordes i sex olika fall med olika inloppshastigheter på 5, 10, 15, 20, 25 och 30 m/s. Drag- och lyftkraft på moduleraderna beräknades för varje fall och dessa skalades sedan upp till verklig storlek.

2.4 Elproduktion

Elproduktionen för respektive koncept och den konventionella anläggningen beräknades med hjälp av programvarorna PVsyst och PV*SOL samt klimatdata från SMHI enligt följande:

- 1) Elproduktion beräknades med PVsyst där klimatfiler använts med av SMHI uppmätt solinstrålningsdata för Luleå respektive Norrköping för tre olika år då instrålningen var låg, medel respektive hög, se även Bilaga 1. Simuleringarna utfördes på en rad av tre solcellsmoduler. Övriga indata till simuleringarna visas i Bilaga 1.
- 2) Radskuggningsförluster beräknades med PV*SOL. Simuleringarna i PV*SOL utfördes på en anläggning med 274 moduler på totalt 125 kW för varje koncept, där rimliga radavstånd för koncepten togs fram iterativt med testsimuleringar. Indata till simuleringarna visas i Bilaga 1.
- 3) Snöskuggningsförluster baserade på olika antaganden, se Bilaga 2, beräknades utifrån SMHI:s data över Sverige gällande snötäcke, snödjup och temperatur.
- 4) Den andel av rad- och snöskuggningsförlusterna som var störst för varje timme drogs sedan bort från elproduktionen simulerad med PVsyst (punkt 1) – detta för att förlusterna inte skulle räknas två gånger vid de tillfällen de sker samtidigt. Sedan beräknades medelvärde av den resulterande produktionen för respektive år.

2.5 Påverkan framtida klimatförändringar

En utvärdering och kvalitativ bedömning av hur framtida förändringar gällande snö, temperatur, instrålning och vind kan påverka konceptens förväntade vindlaster och produktion gjordes utifrån:

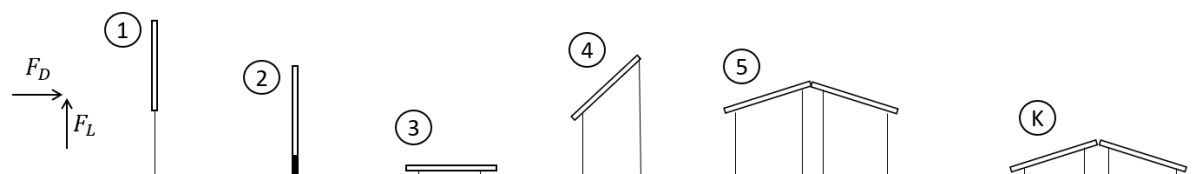
- SMHI:s tre klimatscenarier, RCP2,6 (låg), RCP4,5 (mellan) och RCP8,5 (hög) där RCP står för Representative Concentration Pathways, se Bilaga 3 för Norrbottens och Östergötlands län. Förändringar under en soleanläggnings förväntade livslängd på 25–30 år har bedömts.
- SMHI:s klimatindikatorer för utvecklingen av olika parametrar mellan normalperioden år 1960–1990 respektive år 1991–2020.



3 Resultat

3.1 Koncept

Konceptframtagningen resulterade i fem koncept för vidare utvärdering. Koncepten samt den konventionella anläggningen visas schematiskt i Figur 2 och deras antaganden gällande snöskuggning beskrivs nedan, sammanställning över konceptens egenskaper går att se i Tabell 1.



Figur 2: Schematisk bild från sidan av de fem framtagna koncepten, numrerade 1-5, samt den konventionella låglutande anläggningen markerad med K. Skissen är inte skalenlig. Pilarna visar positiv riktning för drag- respektive lyftkraft från vinden (F_D respektive F_L).

Antaganden gällande snöskuggning för koncepten och den konventionella anläggningen:

- Koncept 1: Snöfri året runt tack vare dess höjd och lutning, vilket innebär att det antas att det inte har några snörelaterade produktionsförluster.
- Koncept 2: Antas inte ansamla snö men produktionsförlusterna beror på snödjupet och bypassdiaternas placeringar. Tappar 1/3 vid 5–34 cm, 2/3 upp till 68 cm, 3/3 vid snödjup över 68 cm.
- Koncept 3: Antas vara snötäckt när marken är snötäckt och producerar då ingenting.
- Koncept 4: Snöfri året runt tack vare dess höjd och lutning, vilket innebär att det antas att det inte har några snörelaterade produktionsförluster.
- Koncept 5: Snön rutschar av vid en dygnsmedeltemperatur på över 0°C och där efter antas modulerna vara snöfri till dess att markens snötäcke har ökat samt att temperaturen är 0°C eller lägre.
- Koncept K (konventionell): Antas vara snötäckt när marken är snötäckt och producerar då ingenting.

Tabell 1: De olika koncepten och den konventionella låglutande anläggningens egenskaper samt resultatet för drag- och lyftkraft vid inloppshastighet på 20 m/s. S står för syd, SN och ÖV står för syd-nord respektive öst-väst. F står för främre modulen och B för bakre modulen.

Koncept	1	2	3	4	5	K
Riktning	SN & ÖV	SN & ÖV	S	SN	ÖV	ÖV
Lutning	90°	90°	0°	45°	10°	10°
Upphöjning[m]	0,8/0,4 ¹	0,05/0,05 ¹	0,05/0,05 ¹	1,2/0,9 ¹	1,2/0,9 ¹	0,05/0,05 ¹
Radavstånd[m] ²	3	3	0,02 ³	2,3	0,2 ³	0,2 ³



Typ av modul	Dubbel	Dubbel	Enkel	Dubbel	Enkel	Enkel
Snöskuggning antagande	Ingen	Snödjup	Snötäcke	Ingen	Snötäcke och temperatur	Snötäcke
Dragkraft [N/m ²]	1516/ 1338 ¹	1427	1	831/700 ¹	0/43 ¹ (F) -62/-105 ¹ (B)	155 (F) -164 (B)
Lyftkraft [N/m ²]	-2/-1 ¹	-4	-974	-826/ -692 ¹	52/-214 ¹ (F) -413/-614 ¹ (B)	-859 (F) -933 (B)

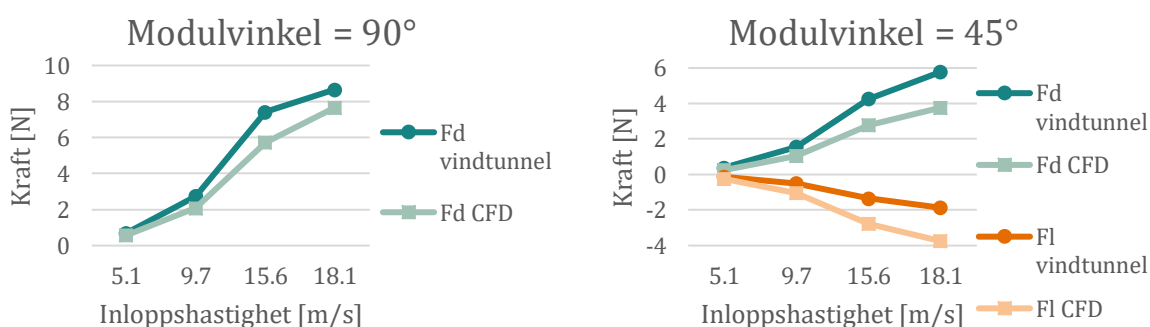
¹Luleå/Norrköping

²Radavståndet är här definierat som det fria avståndet mellan modulraderna

³Anläggningen på 274 moduler delades in i fyra delar med ett litet avstånd emellan för att möjliggöra drift och underhåll

3.2 Utveckling och verifiering av CFD-modell

Jämförelse av drag- och lyftkraft på modulraden uppmätta i vindtunnel vid olika inloppshastigheter mot beräknade med CFD-modellen när modulraden är vinklad 90° respektive 45° visas i Figur 3.



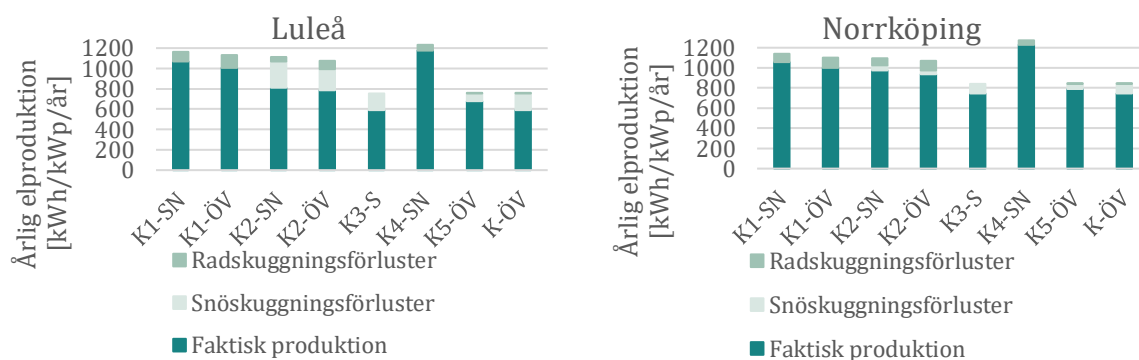
Figur 3: Till vänster visas beräknade krafter med CFD och uppmätta i vindtunnel för en modell vinklad 90° (endast dragkraft eftersom lyftkraften är ~0) och till höger vinklad 45°. Dragkraftens (F_D) och lyftkraftens (F_L) positiva riktningar kan ses i Figur 2. Observera att modellerna är i skala 1:30, därav de låga krafterna.

3.3 Vindlaster

I Tabell 1 visas de beräknade drag- och lyftkrafterna på modulerna i N/m² modul vid 20 m/s för koncepten och konventionella anläggningen. Vindlaster för övriga inloppshastigheter visas i Bilaga 4.

3.4 Elproduktion

I Figur 4 visas den årliga produktionen i kWh per kWp och år för koncepten och konventionella anläggningen i Luleå och Norrköping, där produktionen är uppdelad i snö- och radskuggningsförluster och faktiskt produktion efter förluster. I Bilaga 5 visas produktionen i kWh per m² takyta.



Figur 4: Simulerad årlig produktion (DC) [kWh/kWp/år] för koncepten samt den konventionella anläggningen uppdelad i faktisk produktion och snö- och radskuggningsförluster för Luleå respektive Norrköping.

3.5 Påverkan framtida klimatförändringar

Enligt SMHI ser varken solinstrålning eller byavind ut att förändras väsentligt i framtiden (SMHI, 2022), vilket innebär oförändrad produktion och vindlast. Dock ser temperaturen ut att öka och snön att minska vilket skulle påverka koncepten med snöskuggning positivt med ökad produktion. Bilaga 3 visar förändringar till år 2050 enligt olika klimatscenarier för Norrbottens och Östergötlands län.



4 Diskussion

CFD-modellen visade god överensstämmelse med mätningarna i vindtunneln för krafterna mot de vertikala modulerna. När modulraden vinklades 45° tenderar CFD-modellen att underskatta dragkraften medan den överskattar lyftkraften men trenden var densamma, och modellen har bedömts vara ändamålsenligt för projektet. Med det sagt finns det potential att ytterligare förbättra CFD-modellen, som dock är en förenklad bild av den komplexa verkligheten.

I detta projekt undersöktes fem olika koncept, men det finns fler möjliga utformningar som kan vara relevanta – exempelvis finns möjlighet att undersöka utformningar där modulens vinkel kan justeras, med så kallade "tracking system". Koncepten togs dock fram med representanter både inom projektgruppen och externa deltagare med olika erfarenheter, vilket gav en bredd av olika idéer men också förmodligen realistiska utformningar. Höjden över tak för de upphöjda koncepten är baserad på den gamla normalperioden eftersom data för maximalt snödjup baserat på den nya normalperioden inte fanns tillgängligt vid genomförandet, vilket med ett minskande snödjup innebär att modulerna inte skulle behöva höjas upp så mycket som de gjorts i detta projekt.

CFD-simuleringarna av koncepten visar att ju mer modulerna vinklas upp desto större dragkraft får de av vinden, vilket innebär att dessa måste förankras bättre. En horisontell och en upphöjd låglutande anläggning får låga vindlaster likt den konventionella, men kan kräva ett annorlunda montagesystem. Beräkningarna av vindlaster har utförts för ett "worst case scenario" eftersom endast en modulrad har studerats. För att få ett helhetsperspektiv på vindlasterna behöver beräkningar göras där mer än en rad inkluderas. Detta var inte möjligt att studera med den vindtunnel som användes i detta projekt på grund av dess storlek. Framtida arbete omfattar att utreda vindlasterna i flera rader i en större vindtunnel för att få bättre bild av de förväntade vindlasterna för koncepten. Därefter kan även passande montage- och infästningslösningar tas fram som håller för de förväntade vindlasterna och de mest lovande koncepten utvärderas i en testanläggning på ett tak.

Simuleringarna av produktionen visar att alla koncept ger en lika stor eller högre produktion än en konventionell anläggning, där några koncept sticker ut mer än andra. Förluster relaterade till både snö- och radskuggning har tagits hänsyn till, vilket gör jämförelsen mellan koncepten mer rättvis. Resultatet gällande både andelen snörelaterade produktionsförluster på upp till 24% och den stora variationen av denna andel, beroende på exempelvis latitud (ort) och modullutning, går i linje med tidigare studier kring snöskuggning på soleanläggningar (Øgaard, Riise & Selj, 2021; van Noord, Landelius & Andersson, 2021; Lindh et al, 2020). Detta styrker vikten av att ta hänsyn till snöskuggning vid utformande av soleanläggningar. Snöförlusterna är dock baserade på vissa antaganden, så det råder viss osäkerhet kring vad de verkliga snöförlusterna skulle bli för respektive koncept och dessa skulle behöva mätas i fält för att säkerställas. Snöförlusten kan också förväntas variera med den lokala placeringen och vilket år som undersöks. CFD kan också vara ett verktyg för att studera snöansamlingen genom att inkludera snöpartiklar i modellen.

Förutsättningarna för en enskild installation skiljer sig och olika koncept kan vara lämpliga. Antal moduler som får plats på samma yta skiljer sig stort mellan koncepten så om takytan är begränsad och maximal produktion önskas är detta viktigt att tänka på, där de horisontella och låglutande anläggningarna är mer platseffektiva eftersom ett större radavstånd krävs om modulerna vinklas upp.



Vid val av anläggningens utformning bör också snölaster värderas, där risken för stora laster på modulerna blir mindre om de vinklas och/eller höjs upp. Kostnad för montage och installation är en annan viktig aspekt där till exempel upphöjda koncept kräver mer material och en större anläggning för samma effekt kräver mer kabel. Även möjlighet för drift och underhåll (exempelvis snöskottning på taket) kan vara aspekter som i vissa fall behöver beaktas. Det kan även vara så att det är viktigt med produktion en viss tid på året eller på dygnet, till exempel om byggnaden har stort elbehov en viss årstid eller del av dagen, där koncepten presterar olika.

Det förväntade framtida klimatet med mindre snö och varmare temperaturer skulle kunna medföra att snöproblematiken på solelanläggningar på låglutande tak i nordliga förhållanden minskar framöver. Mer specifikt kan den ökade temperaturen vintertid medföra tunnare snötäcke på modulerna samt att snön på den upphöjda låglutande (K5) väntas glida av oftare då dygnsmedeltemperaturen ökar. En ökad temperatur väntas även medföra ökad snösmältning vilket bidrar till att marken inte är snötäckt i samma omfattning som idag, vilket skulle göra att horisontella (K3) och konventionella (K) bör få ökad produktion då dess produktion antagits vara noll vid snötäckt mark. Minskat antal dagar med snötäckt mark bidrar till ett lägre albedo över året vilket väntas ha större påverkan på de koncept som "ser" mer utav marken och dess reflektion, ju högre lutning desto större påverkan. Snödjupet väntas också minska vilket skulle minska snöskuggningsförlusterna för den vertikala (K2). Minskad snömängd betyder också att snölasten väntas minska men samtidigt väntas mängden blötsnö öka med de varmare vintrarna vilket medför högre snödensitet. Trots en trolig minskning av problemen med snöbelastade och snöskuggade solelanläggningar förväntas dock problemen att kvarstå under lång tid, särskilt i de nordligaste delarna av Sverige. Eftersom SMHI:s analys är att byavindarna är i stort sett densamma kan man anta att om koncepten klarar av dagens vindlaster bör de även klara av framtidens vindlaster.

Projektet förväntas leda till ökad installation av solelanläggningar i snörika regioner och i synnerhet på stora platta och låglutande tak. I längden väntas en majoritet av dessa användas för solelproduktion, där hindret tidigare kan ha varit att produktionsförlusterna på grund av snön blir för stora. Detta har i sin tur möjlighet att bidra med förnybar el till den gröna men elintensiva omställningen som industrierna påbörjat. Om de stora taken som idag är outnyttjade kan användas för att installera solelanläggningar krävs mindre nya markområden vilket annars kan vara ett hinder för utbyggnad av förnybar elproduktion av exempelvis sol och vind. Det är viktigt för utvecklingen av ett hållbart samhälle och ett hållbart energisystem att vi utnyttjar mark och resurser effektivt. Störst nytta av resultatet har de beställare, projektörer och installatörer som är osäkra på snöansamlingar kring låglutande konventionella anläggningar och vill utforska om det finns bättre sätt att utforma anläggningar på platta tak i norr.



5 Slutsatser

Genom att utvärdera fem alternativa utformningar (K1-K5) mot en låglutande konventionell utformning (K) har projektet skapat ny kunskap för hur soleanläggningar kan utformas effektivt för solelproduktion på stora låglutande tak i norr. Utvärderingen visar att större dragkrafter från vinden är att vänta ifall att modulerna vinklas upp 45° (K4) eller 90° (K1 och K2) - kring 10 gånger större än den låglutande konventionella. För K1 och K2 blir dock lyftkraften nära noll medan den för K4 är lik K. Högre produktion per modul väntas från dessa uppvinklade moduler tack vare mindre snöskuggning och mer optimal position mot solens instrålning. Dock krävs ett större radavstånd mellan anläggningens modulrader för att inte radskuggningen ska ge för stora produktionsförluster, vilket i sin tur gör att större yta krävs för samma installerad effekt jämfört med en konventionell låglutande anläggning. Ett större radavstånd underlättar dock för drift och underhåll av tak, till exempel snöskottning. Att höja upp modulerna har också visat sig vara ett effektivt sätt att minska snöskuggningsförluster. Den horisontella (K3) och upphöjd låglutande anläggningen (K5) har visat bra resultat när det gäller vindlaster där krafterna blir låga likt den låglutande konventionella. Studerar man produktion per kvadratmeter har de horisontella och låglutande (K3, K5 och K) stora fördelar även med hänsyn till snöskuggningsförluster. Att komma ihåg är dock att detta sätt att installera ger stora snöskuggningsförluster och snölaster i nordliga förhållanden. Vilken utformning som passar kan behöva utvärderas för varje specifikt fall beroende på dess förutsättningar och behov. Den största förväntade förändringen i klimatet kopplat till de koncept som undersökts i detta projekt är mindre snö, vilket främst skulle påverka koncepten med stor snöskuggning (K2, K3 och K) positivt med ökad produktion.



6 Publikationslista

På RISE webbplats [ri.se](https://www.ri.se) finns en projektbeskrivning av *Anpassning av soleanläggningar till nordiska förhållanden*: <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/anpassning-av-solelanlaggningar-till-nordiska-forhallanden>

Sundström, J., Petersson, A. M., Estola, P., Andersson, R., Svedjeholm, M., & Fooladgar, E. (2023) *Utformning av soleanläggningar på stora låglutande tak på nordliga breddgrader*. RISE.



7 Referenser

Energikontor Norr. (2022) *Norrbottens framtida elbehov*. Hämtad från:

https://energikontornorr.se/wp-content/uploads/2022/05/Norrbottens_framtida_elbehov_Energikontor_Norr_220518.pdf

Energimyndigheten. (2022) *Nätanslutna solcellsanläggningar*. Hämtad från:

<https://www.energimyndigheten.se/statistik/den-officiella-statistiken/statistikprodukter/natanslutna-solcellsanlaggningar/>

Irtaza, H., Agarwal, A. (2018) *CFD Simulation of Turbulent Wind Effect on an Array of Ground-Mounted Solar PV Panels*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 99, 205–218.

Jubayer, C. M., & Hangan, H. (2016) *A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 153, 60-70.

Lindh, M., Svedjeholm, M., Granlund, A., Petersson, J., & Petersson, A. M. (2020) *Handbok för nordlig solel*. Hämtad från: <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1450744/FULLTEXT02.pdf>

SMHI. (2022) *Klimatindikatorer – klimatets utveckling i Sverige*. Hämtad från:

<https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikatorer-1.7050>

van Noord, M., Landelius, T. & Andersson, S. (2021) *Snow-Induced PV Loss Modeling Using Production-Data Inferred PV System Models*. Energies, 14, 1574.

Warsido, W. P., Bitsuamlab, G. T., Barata, J., & Chowdhury, A. G. (2014) *Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array*. Journal of Fluids and Structures, 48, 295-315.

Øgaard, M., Riise, H. N. & Selj, J. H. K. (2021) *Estimation of snow loss for photovoltaic plants in Norway*. Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1081–1087.



Bilaga 1

Global horisontell instrålning (GHI) i Luleå och Norrköping år 2000, 2001 och 2006 (använt i PVsyst) och år 1996–2015 (använt i PV*SOL).

År	GHI Luleå [kWh/m ²]	GHI Norrköping [kWh/m ²]	Källa
2000 ("lågt" år)	857,82	956,87	Uppmätt av SMHI
2001 ("medel" år)	869,62	976,19	Uppmätt av SMHI
2006 ("högst" år)	949,77	1044,92	Uppmätt av SMHI
1996–2015	890,95	988,52	Meteonorm 8.1

Snötäckta dagar (SMHI, normalperioden år 1961–1990)

	Luleå	Norrköping
Normalt antal dygn	175 (185)	100 (125)
Första dagen snötäckt	1/11	1/12
Sista dagen snötäckt	5/5	5/4

Indata till simuleringarna i PVsyst och PV*SOL

	PVsyst	PV*SOL
Klimatfil	SMHI Mätdata år 2000, 2001 och 2006	Meteonorm 8,1 år 1996–2015
Antal moduler	3 (6 för Konzept 5 och K)	274
Moduleffekt (framsida)	Trina 385 W/Trina 385 W*	Q Cells 455 W/ Zshine 455 W*
Nominell effekt	1,155 kWp (2,31 kWp för Konzept 5 och K)	124,67 kWp
Växelriktare	1 kW, Hypontech	100 kW, Huawei
Albedo	0,75 nov-april, 0,2 övrig tid	0,75 nov-april, 0,05 övrig tid
Beräkningsmodell	Perez modell	Hoffmann, Hay & Davies

*Enkel/dubbel



Bilaga 2

Förändringar för Norrbottens län (och i vissa fall Luleå) enligt SMHI:s klimatscenarier. Medelvärden för de klimatscenarier som ingår i ensemblen. Nederbörden anges i procent vilket motsvarar förändringen jämfört med perioden 1971–2000. Temperaturen anges i °C och motsvarar årstidens medeltemperatur jämfört med perioden 1971–2000. Byavinden anges i m/s och motsvarar förändringen jämfört med perioden 1971–2000. Antal dagar med ett snötäcke över 5mm vatteninnehåll ger en uppfattning om antal dagar med snötäckt mark medan snötäckets förändring i procent jämfört med perioden 1963–1992 är mer anpassat för lastberäkningar. All data till tabellen nedan är hämtad från SMHI. Nederbörd, temperatur samt byavind är hämtad i form av årsvärden och med hjälp av en trendlinje har sedan en procentuell ökning till år 2050 kunnat hämtas ut.

Norrbottens län År 2050	RCP2,6 (låg)	RCP4,5 (mellan)	RCP8,5 (hög)
Nederbörd vinter	5,7%	10,9%	16,5%
Nederbörd vår	10,3%	15,3%	19,0%
Nederbörd sommar	9,4%	14,9%	19,5%
Nederbörd höst	8,1%	10,0%	15,5%
Nederbörd årlig	8,4%	12,5%	17,5%
Temperatur vinter	2,6°C	3,8°C	5,2°C
Temperatur vår	2,1°C	2,8°C	3,6°C
Temperatur sommar	1,5°C	2,0°C	2,8°C
Temperatur höst	2,1°C	2,6°C	3,5°C
Temperatur årlig	2,1°C	2,8°C	3,8°C
Snötäcke, minst 5mm vatteninnehåll	-	Ca 140 dagar (Luleå)	Ca 120 dagar (Luleå)
Snötäckets förändring	-	Ca -35- -30% (Luleå)	Ca -40- -35% (Luleå)
Byavind årlig maximal	-0,4m/s	-0,3m/s	-0,2m/s



Förändringar för Östergötlands län (och i vissa fall Norrköping) enligt SMHI:s klimatscenarier. Medelvärden för de klimatscenarier som ingår i ensemblen. Nederbörden anges i procent vilket motsvarar förändringen jämfört med perioden 1971–2000. Temperaturen anges i °C och motsvarar årstidens medeltemperatur jämfört med perioden 1971–2000. Byavinden anges i m/s och motsvarar förändringen jämfört med perioden 1971–2000. Antal dagar med ett snötäcke över 5mm vatteninnehåll ger en uppfattning om antal dagar med snötäckt mark medan snötäckets förändring i procent jämfört med perioden 1963–1992 är mer anpassat för lastberäkningar. All data till tabellen nedan är hämtad från SMHI. Nederbörd, temperatur samt byavind är hämtad i form av årsvärden och med hjälp av en trendlinje har sedan en procentuell ökning till 2050 kunnat hämtas ut.

Östergötlands län År 2050	RCP2,6 (låg)	RCP4,5 (mellan)	RCP8,5 (hög)
Nederbörd vinter	9,0%	10,3%	14,9%
Nederbörd vår	12,1%	13,6%	18,5%
Nederbörd sommar	3,5%	7,7%	8,7%
Nederbörd höst	-1,0%	5,7%	7,9%
Nederbörd årlig	5,1%	8,8%	11,8%
Temperatur vinter	1,4°C	2,2°C	3,2°C
Temperatur vår	1,3°C	2,0°C	2,7°C
Temperatur sommar	1,2°C	1,5°C	2,3°C
Temperatur höst	1,3°C	1,8°C	2,5°C
Temperatur årlig	1,3°C	1,9°C	2,6°C
Snötäcke, minst 5mm vatteninnehåll	-	Ca 40 dagar (Norrköping)	Ca 40 dagar (Norrköping)
Snötäckets förändring	-	Ca -30- -25% (Norrköping)	Ca -30- -25% (Norrköping)
Byavind årlig maximal	-0,3m/s	0,2m/s	0,2m/s



Bilaga 3

Nedan visas de beräknade krafterna på solcellsmodulerna [N/m^2] vid olika vindhastigheter för de olika koncepten samt den konventionella installationen (K), där LÅ står för Luleå och NK för Norrköping. Ju större positiva krafterna är desto rödare och ju större negativa krafterna är desto blåare är de. Krafternas positiva riktning visas i Figur 3.

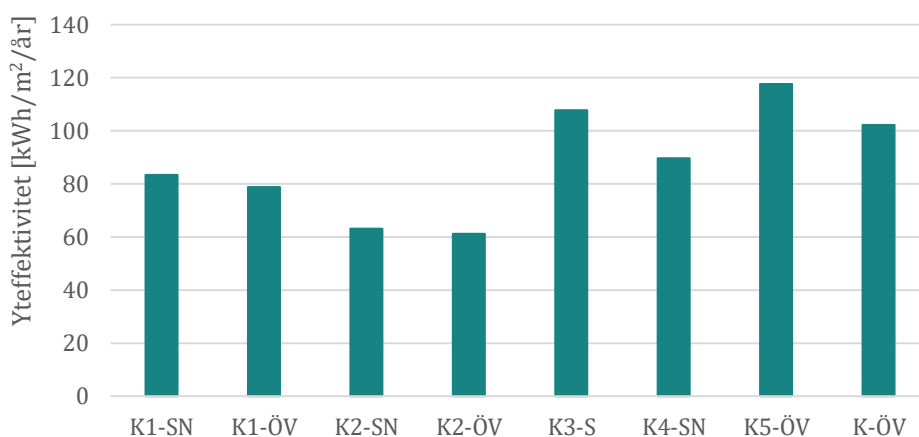
Koncept	Kraft [N/m^2]	Case 1 5 m/s	Case 2 10 m/s	Case 3 15 m/s	Case 4 20 m/s	Case 5 25 m/s	Case 6 30 m/s
1 LÅ	F_D	93	318	819	1516	2398	3460
	F_L	0	0	-1	-2	-3	-4
1 NK	F_D	60	362	775	1338	2116	3079
	F_L	0	0	0	-1	-1	-1
2	F_D	40	318	781	1427	2211	3141
	F_L	0	0	-2	-4	-8	-11
3	F_D	0	0	1	1	2	2
	F_L	-53	-213	-535	-974	-1480	-2094
4 LÅ	F_D	49	168	417	831	1366	2003
	F_L	-49	-166	-414	-826	-1360	-1996
4 NK	F_D	45	161	394	700	1092	1623
	F_L	-44	-158	-389	-692	-1080	-1608
5 LÅ	F_D fram	-1	-1	-2	0	0	2
	F_L fram	9	22	41	52	69	85
	F_D bak	-2	-12	-30	-62	-101	-149
	F_L bak	-18	-89	-210	-413	-663	-973
5 NK	F_D fram	0	9	22	43	70	103
	F_L fram	1	-40	-105	-214	-358	-533
	F_D bak	-3	-22	-55	-105	-171	-252
	F_L bak	-23	-140	-340	-641	-1031	-1514
K	F_D fram	10	38	87	155	237	338
	F_L fram	-52	-208	-481	-859	-1317	-1875
	F_D bak	-9	-39	-92	-164	-254	-364
	F_L bak	-49	-223	-524	-933	-1440	-2066



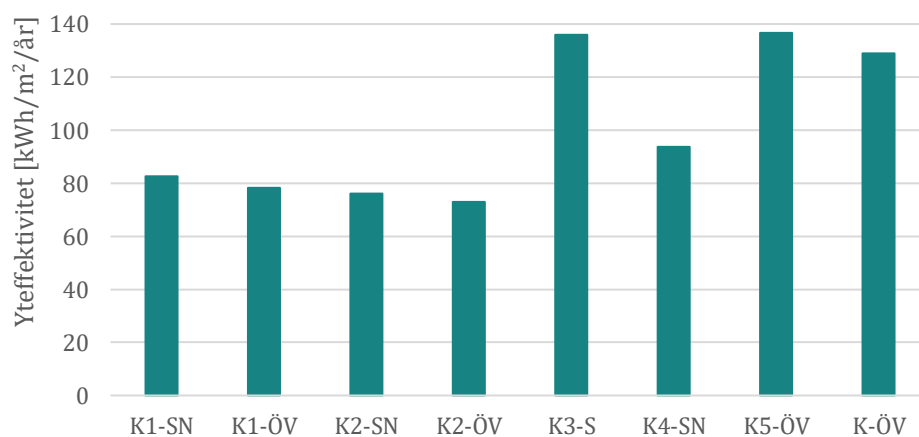
Bilaga 4

Nedan visas simulerad årlig produktion per kvadratmeter för Koncept 1–5 samt den konventionella anläggningen med hänsyn till snöskuggning och radsuggning för Luleå och Norrköping. Detta är elproduktionen som faktiskt fås ut efter att förlusterna dragits bort, innan växelriktare, per kvadratmeter takyta.

Luleå



Norrköping





Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

*E2B2 är Energimyndighetens program där IQ Samhällsbyggnad är koordinator.
Läs mer på www.E2B2.se.*

